

**Untersuchungen zur Qualität der organischen Bodensubstanz und  
zum Kohlenstofffreisetzungspotential von Moorböden  
in Abhängigkeit von Bildungsbedingungen  
und Entwässerungsintensitäten**

**Dissertation**

**(Zweitveröffentlichung)**

**zur Erlangung des akademischen Grades**

**doctor rerum agriculturalarum**

**(Dr. rer. agr.)**

**eingereicht an der**

**Lebenswissenschaftlichen Fakultät  
der Humboldt-Universität zu Berlin**

von

Dipl.-Geogr. Christian Heller

Präsident  
der Humboldt-Universität zu Berlin  
Prof. Dr. Jan-Hendrik Olbertz

Dekan der  
Lebenswissenschaftlichen Fakultät  
Prof. Dr. Richard Lucius

Gutachterinnen

1 Prof. Dr. Jutta Zeitz  
2 Prof. Dr. Friederike Lang

Tag der mündlichen Prüfung: 1.12.2014

Für Tabea und Joseph Ivo

Ernstzunehmende Forschung erkennt man daran,  
dass plötzlich zwei Probleme existieren,  
wo es vorher nur eines gegeben hat.

*Thorstein Bunde Veblen*

## **Abstracts**

Moorböden sind wirksame Speicher für Kohlenstoff (C) und damit bedeutend für das globale Klima. Naturnahe Mooreböden mit hohen Wasserständen können beträchtliche Mengen an C akkumulieren. Durch Entwässerung verlieren sie ihre Netto-Senkenfunktion und setzen verstärkt C frei. Neben äußeren Umweltbedingungen spielt die Qualität der organischen Bodensubstanz (OBS) die entscheidende Rolle bei der C-Freisetzung aus Mooreböden. Gegenwärtig fehlen allerdings detaillierte Daten, die Aussagen zur Qualität der OBS und zur potentiellen C-Freisetzung erlauben. Die vorliegende Arbeit untersucht die Qualität der OBS und das C-Freisetzungspotential ausgewählter Mooreböden in Abhängigkeit von Bildungsbedingungen und Entwässerungsintensitäten mit unterschiedlichen methodischen Ansätzen. Mittels Infrarotspektroskopie konnten deutliche Unterschiede in den Absorptionsspektren zwischen Nieder- und Hochmoortorfen und zwischen unterschiedlich stark entwässerten Torfen gefunden werden. Um das C-Freisetzungspotential zu untersuchen, wurde die labile Fraktion der OBS bestimmt. Dafür wurde eine Methode zur Heißwasserextraktion organischer Böden entwickelt, die erfolgreich an Torfen unterschiedlicher Moorstandorte angewendet werden konnte. In einem weiteren Schritt wurde das Verhältnis von Gesamt-C zu OBS von Moorbodenhorizonten bestimmt. Die dabei gefundenen Abhängigkeiten von der jeweiligen Torfart und der Entwässerungsintensität belegen die Notwendigkeit für angepasste Umrechnungsfaktoren, um Fehler bei C-Bilanzierungen zu vermeiden. Außerdem wurde ein Entscheidungssystem zur Moortypenklassifikation sowie zur Berechnung der C-Speichermengen und C-Freisetzungspotentiale für Moorflächen unbekannten Typs entwickelt. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit können zu einem besseren Verständnis von stofflichen Transformationen in Moorökosystemen beitragen.

Schlagwörter: Mooreböden, Organische Bodensubstanz, Kohlenstofffreisetzung, Moorbildung, Entwässerung

## **Studies on the quality of soil organic matter and the potential carbon release of peatland soils depending on building conditions and drainage intensities**

Peatland soils store huge amounts of organic Carbon (C) and play a substantial role in the global climate system. Undisturbed peatlands with high water-tables accumulate significant C amounts. Through drainage, they change from C-sinks to C-sources. Beside various environmental factors, the quality of soil organic matter (SOM) strongly affects C-release out of peatland soils. Detailed data on SOM quality and potential C-release is currently missing. The present study investigates the quality of SOM and the C-release potential of selected peatland soils depending on building conditions and drainage intensities using various methodical approaches. With infrared spectroscopy, differences in absorption bands between fen and bog peats, as well as between peats under different influence of drainage could be found. The C release potential was investigated by determination of the labile fraction of SOM. For this purpose, a method for the hot-water-extraction of organic soils was developed and could successfully be applied for peats out of different sites. Additionally, organic C in relation to SOM was studied which showed clear relationships with peat types and level of drainage and demonstrates the need for an individual adaption of conversion factors when assessing C stocks. Furthermore, a decision support system for the determination of hydrogenetic mire types and the calculation of C-storages and C-release potentials of unknown peatland areas was developed. The results of the present study may contribute to a better understanding of organic matter transformation in peatlands.

**Keywords:** peatland soils, soil organic matter, carbon release, mire formation, drainage

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstracts .....</b>	<b>iii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>v</b>
<b>1. Einführung .....</b>	<b>- 1 -</b>
1.1 Einleitung und Problemstellung .....	- 1 -
1.2 Bodenbildung in Mooren .....	- 2 -
1.3 Methoden zur Untersuchung der OBS und des C-Freisetzungspotentials in Moorböden .....	- 5 -
1.4 Forschungsfragen .....	- 7 -
1.5 Ziele der Arbeit .....	- 8 -
<b>2. Soil Organic matter characterization of temperate peatland soil with FTIR- spectroscopy: effects of mire type and drainage intensity .....</b>	<b>- 9 -</b>
<b>3. Approaching a standardized method for the hot-water-extraction of peat material to determine labile SOM in organic soils .....</b>	<b>- 10 -</b>
<b>4. Stability of soil organic matter in two northeastern German fen soils: the influence of site and soil development.....</b>	<b>- 11 -</b>
<b>5. Soil Organic Matter to Soil Organic Carbon Ratios of Peatland Soil Substrates .....</b>	<b>- 12 -</b>
<b>6. CARBSTOR – ein Online-Tool für den Moorschutz Berechnung der Kohlenstoff-Speichermenge und des -Freisetzungspotenzials von Moorböden .....</b>	<b>- 13 -</b>
<b>7. Schlussbetrachtung.....</b>	<b>- 14 -</b>
7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	- 14 -
7.1.1 Charakterisierung der chemischen Qualität der OBS von Mooreböden mittels FTIR-Spektroskopie .....	- 14 -
7.1.2 Methodenentwicklung zur Bestimmung der labilen Fraktion von Moorböden durch Heißwasserextraktion .....	- 15 -
7.1.3 Fraktionierung der OBS von Mooreböden im Hinblick auf Abbaustabilität und das C-Freisetzungspotential .....	- 16 -
7.1.4 Untersuchung der Umrechnungsfaktoren von OBS/C <sub>org</sub> in Abhängigkeit von Torfart und Entwässerung .....	- 16 -
7.1.5 Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der C-Speichermengen und des C-Freisetzungspotentials von Mooreböden .....	- 17 -
7.2 Einfluss von Bildungsbedingungen und Entwässerungsintensitäten auf die Qualität der OBS von Mooreböden .....	- 18 -

7.3 Methodische Ansätze zur Charakterisierung der OBS und des C-Freisetzungspotentials von Moorböden .....	21 -
<b>8. Literatur .....</b>	<b>23 -</b>
<b>9. Angaben zum individuellen Beitrag an den veröffentlichten Texten .....</b>	<b>29 -</b>
<b>10. Veröffentlichungen .....</b>	<b>30 -</b>
<b>11. Danksagung .....</b>	<b>33 -</b>
<b>12. Eidesstattliche Erklärung .....</b>	<b>34 -</b>

# 1. Einführung

## 1.1 Einleitung und Problemstellung

Obwohl Moore einen relativ geringen weltweiten Flächenanteil von ungefähr 3 % einnehmen (Joosten und Clarke 2002), ist in ihren Böden etwa 1/3 des gesamten terrestrischen organischen Kohlenstoffs ( $C_{org}$ ), meist in Form von Torfen, gespeichert (Post *et al.* 1982, Turunen *et al.* 2002). Dies entspricht ungefähr der Hälfte der Menge an Kohlenstoff (C), die sich derzeit in der Atmosphäre in Form des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) befindet (Houghton 2007, Limpens *et al.* 2008). Moorböden enthalten hohe Anteile organischer Bodensubstanz (OBS), die bis knapp 100 % (w/w) betragen können. Nach der deutschen bodenkundlichen Klassifikation haben Moorböden einen Mindestgehalt von 30 Masse-% (w/w) OBS und eine Mindestmächtigkeit von 30 cm (Ad-hoc-AG Boden 2005). Die Mehrzahl naturnaher Moore akkumuliert C seit Beginn des Holozäns und trug somit erheblich zur Abkühlung des globalen Klimas bei (Akumu und McLaughlin 2013). Holden (2005) schätzt die globale ‚Kühlungsleistung‘ der Moore durch die Aufnahme und Speicherung von  $CO_2$ -C in den letzten 10.000 Jahren auf etwa 1,5 – 2 °C. Neben dieser bedeutenden ‚historischen Speicherleistung‘ bieten Moore auch eine Vielzahl anderer wichtiger Ökosystem(dienst)-leistungen (Zedler und Kercher 2005), die verstärkt in den Fokus von Naturschutz und Landschaftsplanung gelangen (Maltby 2009, Joosten *et al.* 2013).

Wachsende Moore mit hohen Wasserständen fungieren auch heute noch als C-Senken. Durch Entwässerung und sinkende Moorwasserstände, etwa im Zuge von Meliorationsmaßnahmen, Abtorfungen oder durch klimatisch bedingte Niederschlagsrückgänge verlieren Moore ihre Senkenfunktion und wandeln sich zu C-Quellen, indem z.B. verstärkt gelöster organischer Kohlenstoff (Dissolved Organic Carbon = DOC) bzw.  $CO_2$  freigesetzt wird (Koppisch 2001b). Zahlreiche Untersuchungen beschäftigen sich mit den Auswirkungen von Landnutzung und Entwässerungen auf flüssige oder gasförmige C-Freisetzungen aus Moorböden. Die angegebenen Austräge basieren meist auf kleinräumigen Messungen und schwanken stark (z.B. Mundel 1976, Kasimir-Klemetsson 1997, Blodau 2002, Höper 2007, Schwalm und Zeitz 2011, Hirschfeld *et al.* 2008). Drösler *et al.* (2013) beziffern beispielsweise die derzeitigen Treibhausgasemissionen aus entwässerten Moorböden nutzungsabhängig mit 0 – 34 t  $CO_2$ -Äquivalente je Hektar und Jahr. Dies entspricht einem Anteil von bis zu 5 % an den nationalen Gesamtemissionen, wobei diese Aussagen mit hohen

Unsicherheiten verbunden sind. DOC-Austräge aus Mooren weisen ebenfalls hohe Schwankungsbreiten zwischen 10 und 500 kg C je Hektar und Jahr auf (Holden 2005). In der aktuellen Debatte der Management- und Planungspraxis zu Ökosystemdienstleistungen von Mooren und ihrer Klimawirksamkeit fehlen detaillierte Datengrundlagen, die gebietsbezogene Aussagen zu historischen Speicherleistungen (C-Speichermengen) und zu Gefährdungsabschätzungen im Hinblick auf mögliche C-Verluste (C-Freisetzungspotentiale) für einzelne Moorflächen erlauben (Sachverständigenrat für Umweltfragen 2012). Eine dafür notwendige flächendeckende, zeit- und kostenintensive detaillierte Datenerhebung ist allerdings nicht durchführbar.

## 1.2 Bodenbildung in Mooren

Neben den Umweltbedingungen wie Temperatur, pH oder Wassergehalt spielt die chemische Qualität und Zusammensetzung der OBS sowie deren potentielle Umsetzbarkeit durch Mikroorganismen die entscheidenden Rolle bei der C-Freisetzung aus Moorböden (Haider 1996, Rydin und Jeglum 2006, Berg und McClaugherty 2008, Straková *et al.* 2011).

Nach Kamal und Varma (2008) setzt sich OBS in Moorböden allgemein aus folgenden Komponenten zusammen:

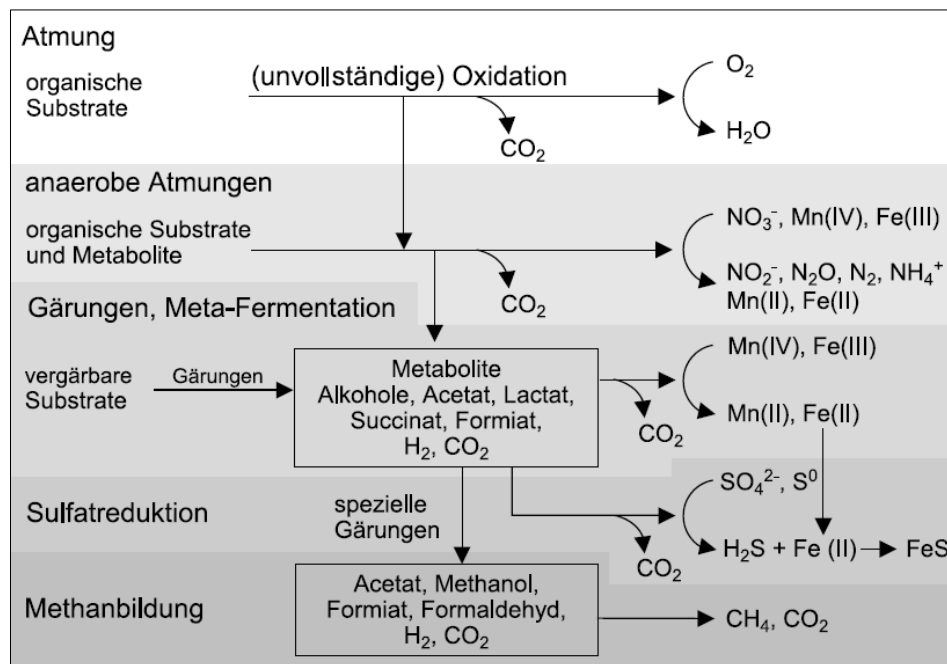
- wasserlösliche Bestandteile wie Stärke, Einfachzucker, einfache Tannine
- ether- und alkohollösliche Materialien wie wachsartige Substanzen, Fette, Pigmente, Alkaloide, Harze
- Cellulose und Hemicellulosen
- Lignin und Lignin verwandte phenolische Substanzen
- stickstoffhaltige Materialien und einfache Proteine

Die jeweilige moorspezifische Zusammensetzung der OBS variiert dabei mehr oder weniger stark und ist durch unterschiedliche bodenbildende Faktoren und Prozesse geprägt. Zunächst hängen Quantität und Qualität der OBS in Moorböden und damit die potentielle C-Freisetzung von den durch die jeweilige Lage des Moores in der Landschaft geprägten hydrologisch-geomorphologischen Bildungsbedingungen ab. Diese bestimmen die Wasser- und Nährstoffversorgung und damit die jeweilige torfbildende Vegetation sowie daraus resultierende Torfarten mit charakteristischen Mächtigkeiten (Succow und Jeschke 1986).



Der oberste, durch Grundwasserschwankungen geprägte Bereich wird auch als ‚Akrotelm‘ bezeichnet. Hier wird die Pflanzenstreu der jeweiligen abgestorbenen feuchtsgebietstypischen Vegetation nur teilweise zersetzt (sog. ‚primäre Torfzersetzung‘) und reichert sich meist sedentär in Form von Torfen an. Mit fortschreitendem Aufwachsen des Moores und einer damit einhergehenden Erhöhung des Moorwasserspiegels gelangen diese Schichten in einen tieferen, ganzjährig wassergesättigten Bereich, das sog. ‚Katotelm‘ (Grosse-Brauckmann 1990).

Im Gegensatz zu Mineralböden, in denen die OBS vor allem durch die Wechselwirkung mit der mineralischen Phase stabilisiert wird, z.B. in Form von organo-mineralischen Komplexen oder durch Einschluss in stabile Mikroaggregate (von Lützow *et al.* 2006), konserviert der Mangel an Sauerstoff im Katotelm die OBS in wassergesättigten Moorböden. Es kommt zu dauerhaft anaeroben und damit torferhaltenden Bedingungen, die eine Zerkleinerungstätigkeit durch die Bodenfauna fast völlig unterbinden und mikrobielle, enzymatisch gesteuerte Umsetzungs- und Abbauprozesse stark verändern und einschränken (Koppisch 2001a, Kleber 2010). Der Wechsel von aeroben zu anaeroben Bedingungen und die damit verbundenen Änderungen in der mikrobiellen Aktivität vollziehen sich als fließender, sukzessiver Übergang. Biochemisch gesehen verringert sich mit abnehmendem Sauerstoffgehalt das Verhältnis von oxidierenden zu reduzierenden Vorgängen, gemessen z.B. als Redoxpotential.



**Abb. 1-1:** Schema der ökophysiologischen Sukzession der mikrobiellen Verwertung von Substraten und Metaboliten durch Atmung, anaerobe Atmungen, Gärungen, Sulfatreduktion und Methanogenese (verändert nach Ottow 2011).

Unter diesen Bedingungen setzen bestimmte Mikroorganismengemeinschaften alternative Elektronenakzeptoren wie Nitrat, Mangan oder Eisen ein, um ihren Energiestoffwechsel aufrecht zu erhalten (anaerobe Atmung). Sinkt das Redoxpotential weiter, so kommt es zu einsetzenden Gärungsprozessen und schließlich zur Methanogenese (Ottow, 2011, Abb. 1-1). Im Ergebnis wird der stoffliche Ab- und Umbau unter anaeroben Bedingungen deutlich gehemmt. Die Folge ist eine Nettoakkumulation organischer Bodensubstanz (OBS), bzw. organischen Kohlenstoffs ( $C_{org}$ ). Dadurch entstanden Moore mit typischer Stratigraphie, Zusammensetzung und Qualität der organischen und anorganischen Komponenten (Cameron *et al.* 1989).

Die gebräuchlichste und einfache Einteilung von Moortypen aufgrund der Wasserspeisung in entweder ombrogene, ausschließlich durch Regenwasser gespeiste Hoch- oder Regenmoore (englisch ‚bogs‘) und minerogene, gleichzeitig auch durch Grund- und Oberflächenwasser gespeiste Niedermoore (englisch ‚fens‘), wird z.B. von Succow (1988) um das Konzept verschiedener hydrogenetischer Moortypen mit jeweils ähnlichen Torfeigenschaften und Moormächtigkeiten erweitert.

Stegmann *et al.* (2001) beschreiben den Vorgang des Moorwachstums aus bodenkundlicher Sicht und weisen in diesem Zusammenhang in Anlehnung an die Begriffe „Akrotelm“ und „Katotelm“ einen „Torfbildungshorizont“ im Grundwasserschwankungsbereich und einen „Torferhaltungshorizont“ im ganzjährig wassergesättigten Bereich aus. Aufgrund der o.g. Prozesse nehmen Moorböden eine Sonderstellung innerhalb der Bodensystematik ein, da mit ihrer Bildung gleichzeitig das geologische Ausgangsmaterial entsteht (Ad-hoc-AG Boden 2005). Deshalb laufen während der Moorbildung sowohl pedogenetische Prozesse (Torfbildung und primäre Torfzersetzung), als auch geogenetische Prozesse (Bildung des geologischen Ausgangsmaterials für eine weitere Bodenentwicklung) ab.

Neben natürlichen bodenbildenden Faktoren, welche die torfbildende Vegetation und den Grad der primären Torfzersetzung während der Torfbildung im Akrotelm von naturnahen Moorlandschaften bestimmen, sind entwässerte Moorböden in Kulturlandschaften stark durch menschliche Nutzungen beeinflusst und überprägt (Succow 1988). Die akkumulierte, bis dahin weitgehend konservierte OBS wird durch Entwässerung verstärkt belüftet und der Um- und Abbau durch Bodenorganismen nimmt deutlich zu. Es kommt erneut zu bodenbildenden Prozessen, der sog. ‚sekundären Pedogenese‘, die neben einer quantitativen Abnahme der OBS und einer C-Freisetzung durch Mineralisierung auch eine deutliche

Qualitätsveränderung - wie z.B. Torfschrumpfung, Gefügebildung, ‚Vererdung‘ oder ‚Vermulmung‘ - bewirken kann (Illner 1977, Zeitz und Stegmann 2001, Zeitz und Velty 2002).

### **1.3 Methoden zur Untersuchung der OBS und des C-Freisetzungspotentials in Moorböden**

Die C-Speichermengen in Moorböden lassen sich aus C-Konzentrationen und Trockenrohdichten berechnen (Zauft *et al.* 2010). Mittlerweile existiert eine Vielzahl automatischer Analysegeräte, die sowohl den gesamt C- als auch den C<sub>org</sub>-Gehalt relativ einfach durch trockene Oxidation und Messung des daraus entstandenen CO<sub>2</sub> mittels Infrarot-Detektion bestimmen (DIN ISO 10694). Vor der Verbreitung dieser Analysegeräte wurde der C<sub>org</sub> hauptsächlich durch nasschemische Oxidation der OBS mittels Kaliumdichromat - der sog. ‚Walkley-Black Methode‘ (Tabatabai 1996) bestimmt. Aufgrund der hohen Toxizität dieses Oxidationsmittels (Carl Roth GmbH 2012) und des relativ hohen analytischen Aufwandes wurde deshalb anstelle des Parameters C<sub>org</sub> häufig die gesamte OBS durch direkte Veraschung der Probe und anschließende Rückwaage bestimmt (Schulte und Hopkins 1996). Mittels geeigneter Umrechnungsfaktoren lassen sich die OBS-Gehalte in C<sub>org</sub>-Konzentrationen umrechnen. Bisherige Vorschläge zur Umrechnung geben feste, für alle Torfarten einheitliche Umrechnungsfaktoren an (z.B. Succow, 1988, Ad-hoc-AG Boden 2005). Unterschiedliche Qualitäten der OBS in Moorböden – etwa durch unterschiedliche Torfarten oder Entwässerungsintensitäten – finden in den bisherigen Umrechnungsfaktoren keine Berücksichtigung, was u.U. zu großen Fehlern in der (historischen) C-Bilanzierung führen kann.

Neben der quantitativen Bestimmung der OBS, des C<sub>org</sub> und der C-Speichermengen lässt sich die OBS in Moorböden im Hinblick auf eine potentielle C-Freisetzung auch strukturell untersuchen. Eine klassische Möglichkeit stellt die Analyse und Auftrennung der gesamten OBS in ‚Huminstoffe‘ dar (Blume *et al.* 1965). Bei diesem Konzept wird davon ausgegangen, dass bei der Humifizierung der abgestorbenen Pflanzenstreu operational definierte Stoffgruppen (Huminfaktionen: Fulvosäuren, Huminsäuren und Humine) gebildet werden, welche aus teilweise sehr stabilen, komplexen Makromolekülen aufgebaut sind und durch Kondensations- und Polymerisationsreaktionen des pflanzlichen Ausgangsmaterials entstehen (Stevenson 1994). Aktuellere Studien lassen allerdings starke Zweifel an der Zweckmäßigkeit

dieses Konzeptes sowie an der klassischen Huminstofffraktionierung allgemein aufkommen (Rice 2001, Sutton und Sposito 2005, Kelleher und Simpson 2006) und gehen von simpler aufgebauten Molekülen pflanzlichen und mikrobiellen Ursprungs als Hauptbestandteile der OBS aus. Diese Bestandteile sind durch relativ schwache Bindungen wie z.B. Wasserstoffbrückenbindung oder hydrophobe Wechselwirkungen mehr oder weniger lose und dynamisch miteinander assoziiert (Piccolo 2001). Die hohen gemessenen Molekülmassen in den einzelnen Huminstofffraktionen werden von Schmidt *et al.* (2011) als chemische Artefakte interpretiert, die erst bei der Huminstoffisolierung im Labor entstehen. Neuere analytische Ansätze der chemischen Strukturaufklärung und Charakterisierung der OBS bedienen sich daher oft spektroskopischer in-situ Techniken (Baldock und Nelson 2000, Kögel-Knabner 2000), wie etwa der Fourier-Transform-Infrarot-(FTIR-) Spektroskopie, bei der wichtige funktionelle Gruppen der OBS zerstörungsfrei detektiert werden können (Martin-Neto *et al.* 2009). Ergänzend dazu lässt sich die OBS aus unterschiedlichen Moorböden auch in biochemisch labile (aktive) oder stabile (passive) Anteile fraktionieren (von Lützow *et al.* 2007) und so im Hinblick auf Aussagen zur Abbaustabilität und potentiellen C-Freisetzung miteinander vergleichen. Zur Abschätzung des C-Freisetzungspotentials spielt vor allem die labile Fraktion die entscheidende Rolle, da sie leicht umgesetzt werden kann und somit potentiell z.B. in Form von CO<sub>2</sub> oder DOC freigesetzt wird (Khanna *et al.* 2001; Rydin und Jeglum 2006, Kalisz *et al.* 2010). Eine standardisierte oder allgemein anerkannte Methodenvorschrift zur Bestimmung der labilen Fraktion und des C-Freisetzungspotentials zur Gefährdungsabschätzung möglicher C-Verluste für organische Böden existiert derzeit nicht.

In der Literatur sind zahlreiche Studien beschrieben worden, welche die chemische Zusammensetzung der OBS von Moorböden untersuchen. So gibt es frühe nasschemische Untersuchungen von z.B. Waksman und Stevens (1928), Souci (1939) oder Theander (1954), bei denen zumeist die Torfqualität für eine Nutzung als Rohstoff im Vordergrund steht. Neuere Arbeiten zur Qualität der OBS beschäftigen sich vielfach mit naturnahen, nicht entwässerten Mooren. So untersuchten z.B. Turetsky (2004), oder Reiche *et al.* (2010) die Beziehung verschiedener Bestandteile der OBS auf die Treibhausgasfreisetzung von Moorböden und fanden Korrelationen zwischen der CO<sub>2</sub>-Freisetzung und den Anteilen wasserlöslicher Bestandteile. Andere Studien naturnaher Moore von Delarue *et al.* (2011) oder Schellekens und Buurmann (2011) beschäftigen sich u.a. mit der Qualität der OBS im Hinblick auf die Rekonstruktion der fossilen torfbildenden Vegetation. Daten zur Qualität der OBS entwässerter Moorstandorte, wie etwa in Arbeiten von Kalisz *et al.* (2010), Šlepetiene *et*

*al.* (2010) oder Straková *et al.* 2011 zu entwässerten Moorstandorten in Polen, im Baltikum oder in Finnland, sind seltener. Obwohl in Deutschland von den derzeit 12.800 km<sup>2</sup> Moorflächen (Roßkopf *et al.* 2014) gegenwärtig nur noch etwa 1 % als relativ naturnah und ungestört zu bezeichnen sind (Couwenberg und Joosten 2001), existieren keine aktuellen vergleichenden Studien zur chemischen Qualität der OBS und zum C-Freisetzungspotential ihrer Böden in Abhängigkeit von Bildungsbedingungen und Entwässerungsintensitäten.

#### 1.4 Forschungsfragen

Vor dem Hintergrund des derzeitigen Kenntnisstandes zur Qualität der OBS von Moorböden in Abhängigkeit von Bildungsbedingungen und Entwässerungsintensitäten stellen sich folgende Fragen:

Welchen Einfluss üben unterschiedliche Bildungsbedingungen und Entwässerungsintensitäten auf die chemische Zusammensetzung der OBS in Moorböden/Moorbodenhorizonten aus?

Durch welche praktisch anzuwendende, reproduzierbare und verlässliche Methode lässt sich die labile Fraktion der OBS bestimmen und damit das C-Freisetzungspotential von Moorböden abschätzen?

Wie verhält sich die labile Fraktion der OBS verschiedener Moorböden im Vergleich zu den schwerer umsetzbaren Anteilen in Abhängigkeit von Bildungsbedingungen und Entwässerungsintensitäten?

Welchen Einfluss haben Bildungsbedingungen und Entwässerungsintensitäten von Moorböden auf die jeweiligen C<sub>org</sub> Gehalte der OBS und wie sind die Umrechnungsfaktoren daran anzupassen?

Wie lassen sich typische C-Speichermengen und C-Freisetzungspotentiale verschiedener Moorflächen unbekannten Typs bestimmen, ohne dabei aufwendige Geländearbeiten durchzuführen?

## 1.5 Ziele der Arbeit

Die Bearbeitung der o.g. Forschungsfragen erfolgte durch Anwendung unterschiedlicher methodischer Ansätze und in verschiedenen Maßstabsebenen. In mehreren Teilschritten wurden dabei folgende Ziele verfolgt:

- 1) Eine Charakterisierung der chemischen Zusammensetzung unterschiedlicher Moorbodenhorizonte aus verschiedenen Moorstandorten durch die Bestimmung bedeutender funktioneller Gruppen der OBS mittels FTIR-Spektroskopie (Heller *et al.* 2014, Kapitel 2).
- 2) Entwicklung einer standardisierten Methode für die Heißwasserextraktion von organischen Böden zur Bestimmung der labilen Fraktion der OBS und des C-Freisetzungspotentials (Heller und Weiß 2014, Kapitel 3).
- 3) Beispielhafte Anwendung dieser Methode und Gegenüberstellung mit stabileren, schwer umsetzbaren Anteilen der OBS an zwei Moorbodenprofilen durch chemische Fraktionierung (Heller und Zeitz 2012, Kapitel 4).
- 4) Untersuchung der Beziehung von OBS und C<sub>org</sub>-Gehalten in verschiedenen Moorbodenhorizonten und Ableitung möglicher Umrechnungsfaktoren in Abhängigkeit von Torfart und Entwässerungsintensität (Klingensfuß *et al.* 2014, Kapitel 5).
- 5) Bestimmung der C-Speicherleistung und des C-Freisetzungspotentials einzelner hydrogenetischer Moortypen und Übertragung dieser Eigenschaften auf andere Moorflächen (Möller *et al.* 2014, Kapitel 6).

Die genaue Beschreibung der in den einzelnen Teilschritten verwendeten Methoden, die daraus resultierenden Ergebnisse und deren Diskussion sind in Form eigenständiger Texte verfasst worden. Diese Texte sind zur Veröffentlichung als Manuskripte in begutachteten Fachzeitschriften eingereicht und z.T. bereits als Artikel veröffentlicht, bzw. zur Veröffentlichung akzeptiert worden. Die Literaturangaben sind nachfolgend abgedruckt (Kapitel 2 bis 6). Der individuelle Beitrag zu den jeweiligen Texten ist angegeben (Kapitel 10).

## **2. Soil Organic matter characterization of temperate peatland soil with FTIR- spectroscopy: effects of mire type and drainage intensity<sup>1</sup>**

C. HELLER<sup>a</sup>, R. H. ELLERBROCK<sup>b</sup>, N. ROBkopf<sup>a</sup>, C. KLINGENFUß<sup>a</sup> & J. ZEITZ<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Humboldt-Universität zu Berlin, Faculty of Life Sciences, Institute of Agriculture and Horticulture, Division of Soil Science and Site Science, Albrecht-Thaer-Weg 2, 14195 Berlin, Germany*

<sup>b</sup>*Leibniz-Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF), Institute of Soil Landscape Research, Eberswalder Str. 84, 15374 Müncheberg, Germany*

---

<sup>1</sup> European Journal of Soil Science (2015, DOI: 10.1111/ejss.12279).

### **3. Approaching a standardized method for the hot-water-extraction of peat material to determine labile SOM in organic soils<sup>2</sup>**

C. HELLER<sup>a</sup> & K. WEIß<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Humboldt-Universität zu Berlin, Faculty of Life Sciences, Institute of Agriculture and Horticulture, Division of Soil Science and Site Science, Albrecht-Thaer-Weg 2, 14195 Berlin, Germany*

<sup>b</sup>*Humboldt-Universität zu Berlin, Faculty of Life Sciences, Institute of Agriculture and Horticulture, Common Laboratory of Analysis, Invalidenstraße 42, 10115 Berlin, Germany*

---

<sup>2</sup> Communications in Soil Science and Plant Analysis (2015): 46(8), 1044-1060 (DOI:10.1080/00103624.2015.1019082).



## **4. Stability of soil organic matter in two northeastern German fen soils: the influence of site and soil development<sup>3</sup>**

C. HELLER & J. ZEITZ

*Humboldt-Universität zu Berlin, Faculty of Agriculture and Horticulture, Division of Soil Science and Site Science, Albrecht-Thaer-Weg 2, 14195 Berlin, Germany*

---

<sup>3</sup> Journal of Soils and Sediments (2012): 12, 1231-1240 (DOI 10.1007/s11368-012-0500-6).

## **5. Soil Organic Matter to Soil Organic Carbon Ratios of Peatland Soil Substrates<sup>4</sup>**

C. KLINGENFUß, N. ROßKOPF, J. WALTER, C. HELLER & J. ZEITZ

*Humboldt-Universität zu Berlin, Faculty of Life Sciences, Institute of Agriculture and Horticulture, Division of Soil Science and Site Science, Albrecht-Thaer-Weg 2, 14195 Berlin, Germany*

---

<sup>4</sup> Geoderma (2014): 235-236, 410-417 (DOI:10.1016/j.geoderma.2014.07.010).

## **6. CARBSTOR – ein Online-Tool für den Moorschutz Berechnung der Kohlenstoff-Speichermenge und des -Freisetzungspotenzials von Moorböden<sup>5</sup>**

D. MÖLLER, C. HELLER & J. ZEITZ

*Humboldt-Universität zu Berlin, Lebenswissenschaftliche Fakultät, Albrecht Daniel Thaer -  
Institut für Agrar- und Gartenbauwissenschaften, Fachgebiet Bodenkunde und Standortlehre,  
Albrecht-Thaer-Weg 2, 14195 Berlin, Germany*

---

<sup>5</sup> Naturschutz und Landschaftsplanung (2014): 46 (7), 201-210.

## 7. Schlussbetrachtung

### 7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss von Bildungsbedingungen und Entwässerungsintensitäten auf die Qualität der OBS von Moorböden und das C-Freisetzungspotential untersucht. Dafür wurden die Forschungsfragen (Kapitel 1.4) auf unterschiedlichen Maßstabsebenen mittels verschiedener methodischer Ansätze bearbeitet (Kapitel 2 bis 6). Im folgenden Abschnitt werden die gewonnenen Erkenntnisse der einzelnen Kapitel zusammenfassend dargestellt.

#### 7.1.1 Charakterisierung der chemischen Qualität der OBS von Moorböden mittels FTIR-Spektroskopie

Der Einfluss von Bildungsbedingungen und Entwässerungsintensitäten auf die chemische Zusammensetzung der OBS von Moorböden wurde mittels Fourier-Transform-Infrarot(FTIR)-Spektroskopie an drei Pflanzenproben typischer torfbildender Pflanzen, sowie an 29 Torfproben aus sieben verschiedenen Standorten in Norddeutschland untersucht (Kapitel 2, Heller *et al.* 2014). Dabei zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen FTIR-Absorptionsspektren aufgrund unterschiedlicher Bildungsbedingungen. Die Absorptionsbanden der Niedermoortorfe wichen erheblich von denen der Hochmoortorfe und der Pflanzenproben ab. Im Gegensatz dazu wiesen die Spektren der Hochmoortorfe höhere Ähnlichkeiten zu den Spektren der Pflanzenproben auf. Dies ist vermutlich auf die vergleichsweise nährstoffärmeren und sauren Bedingungen an den zwei untersuchten Hochmoorstandorten zurückzuführen, unter denen die OBS - im Gegensatz zu den eutrophen Niedermoorstandorten mit höherer biologischer Aktivität – stärker konserviert wird. Neben den natürlichen Bildungsbedingungen konnten deutliche Unterschiede aufgrund unterschiedlicher Entwässerungsintensitäten in den Spektren der Niedermoortorfe gefunden werden. Im Gegensatz zu den ganzjährig wassergesättigten Torfhorizonten, in denen sich unter anaeroben Bedingungen CH-Gruppen der aliphatischen, hydrophoben und schwerer abbaubaren Verbindungen relativ zum Gehalt an Carbonyl (C=O)-Gruppen anreichern, sinkt das Verhältnis von CH/C=O mit fortschreitender Entwässerungsintensität. Dieser signifikante relative Rückgang schwerer abbaubarer Anteile zeigt den entwässerungsbedingten Einfluss der verstärkt einsetzenden aeroben Zersetzungs- und Transformationsvorgänge auf die

Qualität der OBS in den untersuchten Torfen. Es konnten keine signifikanten Unterschiede in den Anteilen funktioneller Gruppen zwischen Torfproben mit unterschiedlichen Zersetzungsgraden gefunden werden. Diese diagnostische Einstufung der Zersetzung, bzw. des Fasergehaltes im Gelände differenziert nicht zwischen einer primären Zersetzung während der Torfbildung und der durch Entwässerung verursachten, sekundären Torfzersetzung und lässt deshalb keine eindeutigen Schlüsse auf die jeweilige chemische Zusammensetzung zu.

### **7.1.2 Methodenentwicklung zur Bestimmung der labilen Fraktion von Moorböden durch Heißwasserextraktion**

Um das C-Freisetzungspotential beschreiben zu können, ist es wichtig, die labile bzw. aktive Fraktion der OBS zu bestimmen, da diese potentiell leicht umgesetzt bzw. mineralisiert und z.B. in Form von CO<sub>2</sub> freigesetzt werden kann. Eine der labilsten Fraktionen ist der heißwasserextrahierbare Teil der OBS. Zahlreiche Studien beschreiben unterschiedliche methodische Ansätze zur Heißwasserextraktion. Diese Unterschiede erschweren die Vergleichbarkeit von Ergebnissen aus unterschiedlichen Studien. Für Moorböden existieren nur wenige Daten. Um eine reproduzierbare Methodik zur Heißwasserextraktion der OBS speziell für Moorböden zu entwickeln und insbesondere deren hohe OBS-Gehalte zu berücksichtigen, wurde eine anerkannte VDLUFA-Verbandsmethode für grundwasserferne Mineralböden adaptiert (Kapitel 3, Heller und Weiß 2014). Dafür wurden 96 Extrakte aus unterschiedlich getrockneten Moorbodenproben in unterschiedlichen Verhältnissen von Einwaage/Lösungsmittel hergestellt und vor der Analyse teilweise filtriert, bzw. unfiltriert gemessen. Die Ergebnisse zeigten, dass das Verhältnis von Einwaage (Boden) zu Extraktionsmittel (Wasser) wesentlichen Einfluss auf die extrahierten OBS-Gehalte hat und deshalb an die hohen organischen Gehalte von Moorböden angepasst werden muss. Zur Bestimmung von heißwasserextrahierbarem C in Moorböden empfiehlt sich deshalb ein Extraktionsverhältnis Boden/Wasser von 1/800 (w/v). Falls dabei die N-Gehalte im Heißwasserextrakt eine zu hohe Streuung aufweisen, sind Wiederholungsextraktionen unter höheren Verhältnissen zu wählen. Die Unterschiede in den gemessenen extrahierten C- und N- Gehalten zwischen luft- und gefriergetrockneten Proben waren nicht signifikant, so dass die Probenkonservierung sowohl durch Gefrier- als auch durch Lufttrocknung erfolgen kann. Eine Filtration der Extrakte nach der Zentrifugation ist nicht notwendig.

### **7.1.3 Fraktionierung der OBS von Moorböden im Hinblick auf Abbaustabilität und das C-Freisetzungspotential**

Um den jeweiligen Einfluss von Bildungsbedingungen und Entwässerungsintensitäten sowohl auf die labilen, potentiell leicht umsetzbaren Anteile als auch auf die stabilen, schwerer umsetzbaren Anteile der OBS in Moorböden zu bestimmen, wurden acht Torfproben und zwei Proben torfbildender Pflanzen aus einem Verlandungsmoor („terrestrialization mire“) und einem Versumpfungsmoor („paludification mire“) in Brandenburg untersucht (Kapitel 4, Heller und Zeitz 2012). Die Bestimmung der labilen Anteile erfolgte durch die Fraktionierung der OBS mittels der eigens für organische Böden entwickelten Heißwasserextraktionsmethode (Kapitel 3). Die stabileren Anteile wurden durch die Fraktionierung der säureunlöslichen Anteile bestimmt. Daneben wurden pH-Werte sowie die Gesamtgehalte an C, C<sub>org</sub> und N gemessen. Aufgrund der charakteristischen Bildungsbedingungen wiesen die Torfproben des Verlandungsmoorstandortes deutlich höhere pH-Werte und errechnete Gehalte an anorganischem C als die restlichen Torfe auf. An beiden Standorten konnte eine Anreicherung der stabileren säureunlöslichen Anteile und eine gleichzeitige Verringerung der labilen Anteile mit fortschreitendem Alter bzw. der Bodentiefe festgestellt werden. Im Gegensatz dazu nahmen die labilen Anteile mit zunehmender Entwässerungsintensität in den belüfteten und durch sekundäre Zersetzung und Bodenbildung geprägten Oberböden relativ zu, bei einer gleichzeitigen Abnahme der stabileren säureunlöslichen Anteile. Insgesamt scheint der Einfluss der Entwässerung den Einfluss der Bildungsbedingungen zu überlagern.

### **7.1.4 Untersuchung der Umrechnungsfaktoren von OBS/C<sub>org</sub> in Abhängigkeit von Torfart und Entwässerung**

Um den Einfluss verschiedener Bildungsbedingungen und Entwässerungsintensitäten auf die jeweiligen OBS/C<sub>org</sub> - Verhältnisse von Moorböden zu untersuchen, wurden 311 Torfproben bzw. Proben humoser Sande von Moorfolgeböden aus Nordostdeutschland analysiert (Kapitel 6, Klingenfuß *et al.* 2014). Dabei zeigte sich, dass die Gruppe der Bleichmoostorfe (*Sphagnum spec.*) - vermutlich aufgrund der relativ geringen C-Konzentrationen in torfbildenden Moosen - signifikant höhere OBS/C<sub>org</sub>-Verhältnisse aufwiesen als Torfe, die aus Gefäßpflanzen gebildet wurden. Der Einfluss der Entwässerung auf die OBS/C<sub>org</sub>-Verhältnisse konnte durch einen Vergleich entwässerter Oberböden mit ganzjährig wassergesättigten Torfen nachgewiesen werden. Dabei zeigte die Gruppe der Torfe ohne erkennbaren Entwässerungseinfluss deutlich höhere OBS/C<sub>org</sub>-Verhältnisse als entwässerte

Torfe. Hoch zersetzte amorphe Torfe und Moorfolgeböden (stark humose Sande) wiesen vergleichsweise hohe Streuungen auf. Um größere Rechenfehler zu vermeiden, wird deshalb vorgeschlagen, jeweils an die Torfarten angepasste Umrechnungsfaktoren bei der C-Bilanzierung zu verwenden.

#### **7.1.5 Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der C-Speichermengen und des C-Freisetzungspotentials von Moorböden**

Die Bestimmung der historischen Klimaschutzleistung und die Gefährdungsabschätzung von möglichen C-Verlusten aus Moorböden erfordert die Ermittlung von C-Speichermengen und C-Freisetzungspotentialen. Um aufwendige und flächendeckende Geländearbeiten umgehen zu können wurde das ‚CARBSTOR‘-Verfahren entwickelt (Kapitel 6, Möller *et al.* 2014). Dabei handelt es sich um eine Methode, mit der es möglich ist, eine Moorfläche unbekannten Typs auf Basis frei verfügbarer Geodaten in einen dominierenden Moortyp zu klassifizieren. Die Moortypenklassifikation erfolgt durch ein hierarchisches Abfragesystem, das mit Geodaten aus Norddeutschland entwickelt und validiert wurde. In einem weiteren Schritt wurden idealisierte Leitprofile mit charakteristischer Stratigraphie für die flächenmäßig bedeutendsten Moortypen ausgewiesen und anschließend mit typischen C-Speichermengen und C-Freisetzungspotentialen verknüpft. Dies geschah sowohl durch eigene Probenahme- und Laborarbeiten als auch durch die Auswertung von Fremddaten zu  $C_{org}$ -Gehalten und Trockenrohdichten. Die Zuweisung der ermittelten moortypenabhängigen C-Speichermengen und C-Freisetzungspotentiale zu einer konkreten Moorfläche ermöglicht eine flächengenaue Bestimmung der historischen Speicherleistung und deren Gefährdung im Hinblick auf mögliche C-Verluste. Dabei unterscheiden sich die Moortypen aufgrund unterschiedlicher Bildungsbedingungen und der Entwässerungsintensitäten teilweise erheblich voneinander und ermöglichen so eine Differenzierung ohne Datenerhebung im Gelände. Das Verfahren ist im Internet frei verfügbar ([www.carbstor.de](http://www.carbstor.de)) und dient als Unterstützungs- und Entscheidungshilfe für naturschutzfachliche Fragestellungen.

## 7.2 Einfluss von Bildungsbedingungen und Entwässerungsintensitäten auf die Qualität der OBS von Moorböden

Die gewonnenen Ergebnisse aus den einzelnen Untersuchungen (Kapitel 2 - 6) lassen allgemeine Schlussfolgerungen zur Beeinflussung der Qualität der OBS in Moorböden zu. Generell lassen sich drei Phasen der Bodenbildung in Mooren beschreiben, in denen jeweils unterschiedliche Einflüsse auf die Qualität der OBS einwirken. Diese Phasen sind nachfolgend beschrieben und schematisch abgebildet (Abb. 7 - 1).

Die ersten beiden Phasen der Bodenbildung sind durch die natürlichen hydrologisch-geomorphologischen und landschaftstypischen Bildungsbedingungen geprägt, die auch die Qualität der OBS bestimmen. In der ersten Phase (Torfbildung) herrschen wechselfeuchte, sowohl aerobe als auch anaerobe Verhältnisse im Grundwasserschwankungsbereich (Torfbildungshorizont oder Akrotelm). Die jeweilige landschaftstypische Wasser- und Nährstoffversorgung bestimmt die torfbildende Vegetation. Dabei entstehen unterschiedliche Moortypen mit charakteristischen Torfarten (z.B. *Sphagnum spec.*, *Carex spec.* etc....). Im Allgemeinen besitzen Gefäßpflanzen höhere C-Anteile als Moose, was sich auch in den höheren OBS/C<sub>org</sub>-Verhältnissen der daraus entstehenden Torfe widerspiegelt. Die individuellen Bildungsbedingungen bestimmen neben den Torfarten auch die Moormächtigkeiten und damit die C-Speichermengen in Moorböden. Durchströmungsmoore enthalten z.B. aufgrund ihrer regelmäßigen und permanenten Wasserspeisung durchschnittlich weitaus mächtigere Torfhorizonte mit niedrigeren Zersetzungsgraden als Versumpfungsmoore, die vergleichsweise stark schwankende Moorwasserspiegel und dadurch auch höher zersetzte Torfe aufweisen.

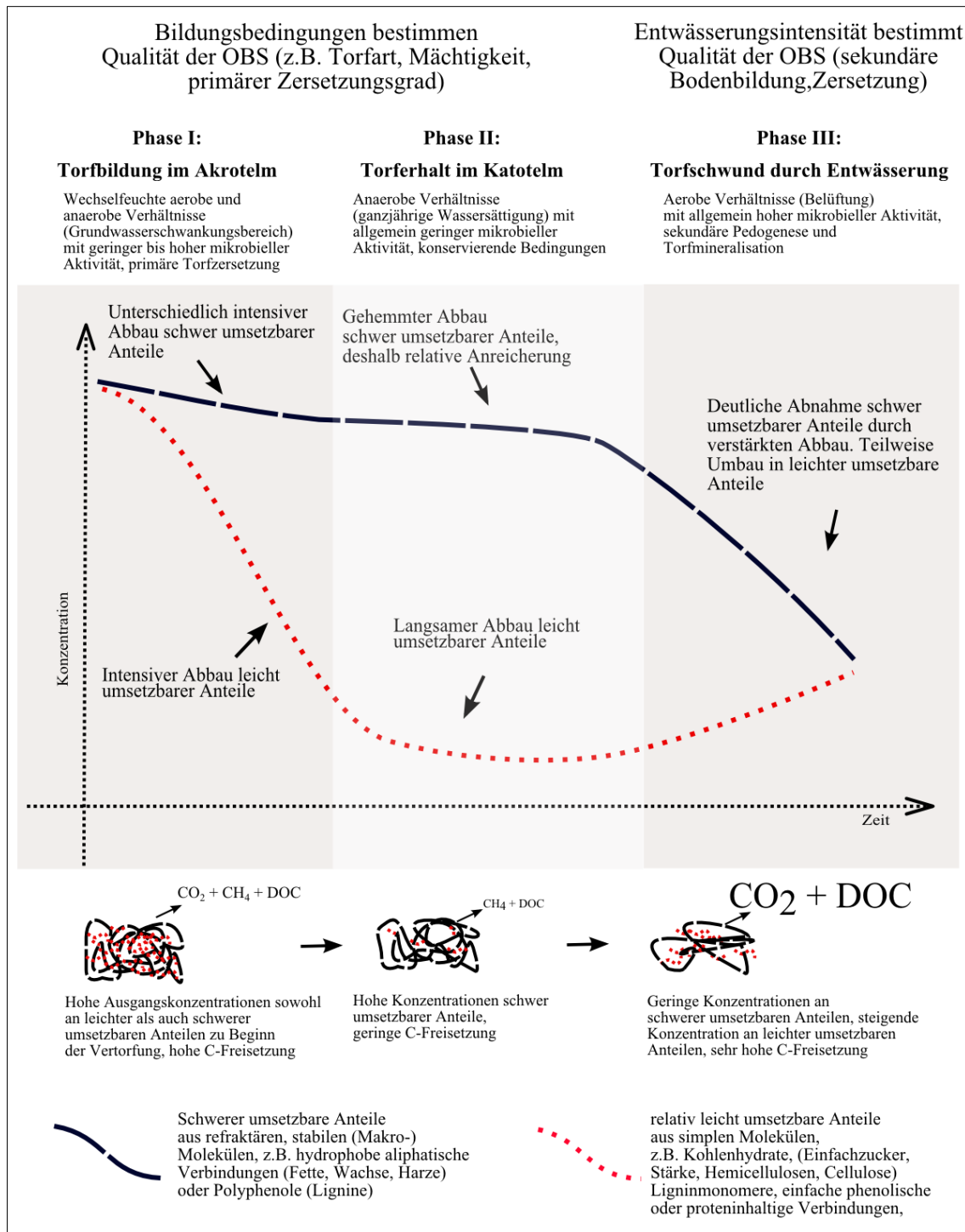
Die Verweilzeit des abgestorbenen, vertorfenden Pflanzenmaterials im Akrotelm und die jeweiligen pH-, Redox- und Trophieverhältnisse steuern die Intensität der primären Torfzersetzung und die C-Freisetzung. Sowohl die Konzentrationen der leicht umsetzbaren Anteile (z.B. hydrophile Verbindungen wie Kohlenhydrate, einfachere proteinhaltige Verbindungen, Teile der mikrobielle Biomasse) als auch die der stabileren Anteile (z.B. aliphatische und hydrophobe Verbindungen wie Wachse, Harze und Lipide oder Polyphenole wie z.B. Lignin) sind in dieser Phase relativ hoch. Allgemein gilt, dass die mikrobielle Aktivität in Hochmooren geringer und damit die stoffhaltenden Bedingungen höher als in Niedermooren sind. Deshalb weist die Zusammensetzung und die Qualität der OBS von Hochmoortorfen größere Ähnlichkeiten zu torfbildenden Pflanzen auf als die OBS von



Niedermoortorfen. Dies konnte durch die Ähnlichkeit der Absorptionsspektren von Hochmoortorfen und torfbildenden Pflanzen gezeigt werden.

In der zweiten Phase (Torferhaltung) herrschen vorwiegend anaerobe und reduzierende Bedingungen im permanent wassergesättigten Bereich (Torferhaltungshorizont oder Katotelm). Die mikrobielle Aktivität ist stark gehemmt und die C-Freisetzung sehr gering. Im Gegensatz zu unzersetzten, torfbildenden Pflanzen ist der Anteil an labilen Anteilen (heißwasserextrahierbare OBS) in wassergesättigten Torfen deutlich niedriger, was für einen bevorzugten Abbau leicht umsetzbarer Anteile unter diesen anaeroben Bedingungen spricht. Im Gegensatz dazu können die stabileren, schwerer umsetzbaren Anteile der OBS in Abwesenheit von Sauerstoff schlechter abgebaut werden und reichern sich daher relativ an. Dies konnte einerseits durch höhere Gehalte der säureunlöslichen Fraktion sowie durch hohe relative Anteile von CH-Gruppen bei relativer Abnahme der C=O Gruppen in Spektren von ganzjährig wassergesättigten Torfen gezeigt werden. Qualitätsunterschiede der OBS in Abhängigkeit der natürlichen Bildungsbedingungen lassen sich vor allem im Vergleich von Hoch- und Niedermoortorfen erkennen. FTIR-Absorptionsbanden der grundwassergespeisten Niedermoorböden sind deutlich heterogener als die Banden der Hochmoorböden. Außerdem wirken sich hohe Kalkgehalte, wie sie in Verlandungsmooren auftreten können, auf die pH-Werte sowie die Gehalte an anorganischem C aus und zeigen scharfe Absorptionsbanden in den FTIR-Spektren.

Die dritte Phase (Torfschwund) ist geprägt durch Entwässerung und Belüftung des Oberbodens und daraus resultierende aerobe und oxidierende Bedingungen mit allgemein hohen C-Freisetzungen. Dabei werden die vormals konservierten, stabileren Anteile der OBS verstärkt umgesetzt, so dass ihre Konzentration deutlich abnimmt. Dies ist in den allgemein geringeren Anteilen an CH-Gruppen sowie den abnehmenden Gehalten an säureunlöslichen Bestandteilen in entwässerten Torfen zu erkennen. Möglicherweise findet dabei auch eine Transformation schwer abbaubarer Verbindungen in leichter umsetzbare Bestandteile (z.B. mikrobielle Biomasse) statt, was die Zunahme der heißwasserextrahierbaren, labilen Anteile in den Oberböden erklären würde. Die signifikant geringeren relativen Anteile schwer abbaubarer Verbindungen (z.B. Alkyl-C) in belüfteten Oberböden und die mit fortschreitender sekundärer Bodenentwicklung und Mineralisierung verbundene C-Freisetzung verdeutlicht den intensiven Einfluss der Entwässerung.



**Abb. 7-1:** Schema der Konzentrationsänderung leicht und schwer umsetzbarer Anteile der organischen Bodensubstanz (OBS) von Moorböden während Torfbildung, Torferhalt und anschließender Entwässerung.

Die Auswertung der OBS/Corg-Verhältnisse zeigte ebenfalls den Entwässerungseinfluss auf die Qualität der OBS in Moorböden. Insgesamt scheint der Einfluss der Entwässerung den Einfluss der Bildungsbedingungen zu überlagern. Besonders anschaulich wird dies am Beispiel der Folgeböden (Anmoorhorizonte, humose Sande bzw. reliktsche Torfe), die  $C_{org}$ -

Gehalte von unter 15 Masse-% besitzen und damit im eigentlichen bodenkundlichen Sinn nicht mehr in die Klasse der Moorböden fallen.

### **7.3 Methodische Ansätze zur Charakterisierung der OBS und des C-Freisetzungspotentials von Moorböden**

Innerhalb der vorliegenden Arbeit kamen verschiedene Methoden und Ansätze zur Untersuchung der OBS von Moorböden zum Einsatz. Die Anwendung der FTIR-Spektroskopie und die Auswertung unterschiedlicher Absorptionsbanden erlaubte die semi-quantitative Analyse wichtiger funktioneller Gruppen. Damit kann sie einen wichtigen Beitrag zur Strukturaufklärung der OBS von Moorböden leisten. Durch die Gegenüberstellung und den Vergleich der spektralen Eigenschaften ganzjährig wassergesättigter Torfe mit denen von unterschiedlich stark entwässerten Torfen sowie torfbildender Pflanzen ist es möglich, den Einfluss unterschiedlicher Bildungsbedingungen und Entwässerungsintensitäten auf die chemische Zusammensetzung der OBS auf molekularer Ebene zu untersuchen. Die FTIR-Spektroskopie ist relativ leicht durchführbar und ermöglicht eine zerstörungsfreie in-situ-Analyse des Probenmaterials in relativ kurzer Zeit. Allerdings können mineralische Anteile (z.B. Silikate) in Torfen und Pflanzen die Absorptionsbanden der organischen Substanz überlagern und eine Auswertung erschweren.

Die Untersuchung der labilen Fraktion der OBS erfolgte durch Heißwasserextraktion. Mit der eigens für organische Böden entwickelten Methode lässt sich der heißwasserextrahierbare C und N unterschiedlicher Moorstandorte bestimmen und miteinander vergleichen. Damit ist eine Abschätzung des C-Freisetzungspotentials möglich. Die Messung der Extrakte von Proben mit sehr geringen N-Konzentrationen kann allerdings zu analytischen Problemen führen. Die Fraktionierung der OBS und die direkte Gegenüberstellung labiler, heißwasserextrahierbarer Anteile mit stabilen, säureunlöslichen Bestandteilen ermöglicht es, Aussagen zur Qualität der OBS sowie zum C-Freisetzungspotential und zur Abbaustabilität von Moorböden in Abhängigkeit unterschiedlicher Entwässerungsintensitäten und Bildungsbedingungen zu treffen.

Die gewählten Untersuchungsmethoden erlauben keine vollständige Strukturaufklärung der OBS. Allerdings leisten die Ergebnisse aus den vergleichenden Studien einen Beitrag zum besseren Verständnis von stofflichen Transformationsprozessen in Moorökosystemen in Abhängigkeit von Bildungsbedingungen und Entwässerungsintensitäten. Zu weiterführenden

qualitativen Untersuchungen der OBS in Moorböden könnten die eingesetzten Untersuchungsmethoden in zukünftigen Arbeiten mit anderen spektroskopischen Methoden, wie z.B. der Nuklearmagnetresonanz(NMR-)Spektroskopie oder chromatographischen Methoden, z.B. mit Hilfe der Pyrolyse-Gaschromatographie-Massenspektrometrie (Py-GC/MS), kombiniert werden. Um die vorgestellte Methode der Heißwasserextraktion zu standardisieren und zu etablieren, müssen vergleichende Analysen, etwa in Form von Ringversuchen, durch unabhängige Labore erfolgen.

## 8. Literatur

Die nachfolgend aufgeführte Literatur bezieht sich auf den Einführungsteil (Kapitel 1) und die Schlussbetrachtungen (Kapitel 7) der vorliegenden Arbeit.

Ad-hoc-AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Hannover.

Akumu, C. E., McLaughlin, J. W. (2013): Regional variation in peatland carbon stock assessments, northern Ontario, Canada. *Geoderma* 209-210, 161-167.

Baldock, J.A., and Nelson, P.N. (2000): Soil organic matter. In: Sumner, Malcolm E., (ed.) *Handbook of Soil Science*, 25-84. CRC Press, Boca Raton.

Blodau, C. (2002): Carbon cycling in peatlands: A review of processes and controls. *Environmental Reviews* 10, 111-134.

Blume, H.-P. (1956): Die Charakterisierung von Humuskörpern durch Streu- und Humus-Stoffgruppenanalysen unter Berücksichtigung ihrer morphologischen Eigenschaften. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 111, 95-113.

Cameron, C.C., Esterle, J.S., and Palmer, C.A. (1989): The geology, botany and chemistry of selected peat-forming environments from temperate and tropical latitudes. *International Journal of Coal Geology* 12, 105-156.

Carl Roth GmbH (2012): Sicherheitsdatenblatt „Kaliumdichromat“ gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, Karlsruhe.

Couwenberg, J. und Joosten, H. (2001): Zur anthropogenen Veränderung der Moore -Das Beispiel Deutschland. In: Succow, M. & Joosten, H. (Hrsg.) *Landschaftsökologische Moorkunde* (2. Aufl.), 409 – 411, Schweizerbarth, Stuttgart.

Delarue F, Laggoun-Défarge F, Disnar J. R., Lottier N, Gogo S (2011): Organic matter sources and decay assessment in a sphagnum dominated peatland (Le Forbonnet, Jura Mountains, France): impact of moisture conditions. *Biogeochemistry* 106, 39–52.

DIN ISO 10694: Bodenbeschaffenheit: Bestimmung des organischen Kohlenstoffgehaltes und des Gesamtkohlenstoffgehaltes nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse).

Drösler, M., Adelmann, W., Augustin, J., Bergman, L., *et al.* (2013): Klimaschutz durch Moorschutz : Schlussbericht des Vorhabens "Klimaschutz – Moorschutzstrategien "2006 - 2010. Technische Universität, München, online unter:[http://literatur.ti.bund.de/digbib\\_extern/dn052361.pdf](http://literatur.ti.bund.de/digbib_extern/dn052361.pdf), letzter Zugriff 14.01.2014

- Grosse-Brauckmann, G. (1990): Ablagerungen der Moore. In: Göttlich K.(Hrsg.) Moor- und Torfkunde (3. Aufl.), 175 – 236. Schweizerbart, Stuttgart.
- Gondar, D., Lopez, R., Fiol, S., Antelo, J. M., Arce, F. (2005): Characterization and acid–base properties of fulvic and humic acids isolated from two horizons of an ombrotrophic peat bog. *Geoderma*, 126(3), 367-374.
- Heller, C. Zeitz, J. (2012): Stability of soil organic matter in two northeast German fens: The influence of site and soil development. *Journal of Soils and Sediments* 12, 1231-1240.
- Heller, C., Weiß, K. (2015): Approaching towards a standardized method for the hot-water-extraction of peat material to determine labile SOM in organic soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46 (8), 1044-1060 (DOI:10.1080/00103624.2015.1019082).
- Heller, C., Ellerbrock, R.H., Roßkopf, N., Klingenfuß, C. Zeitz, J. (2015): Soil Organic matter characterization of temperate peatland soil with FTIR- spectroscopy: effects of mire type and drainage intensity. *European Journal of Soil Science* (DOI: 10.1111/ejss.12279).
- Hirschfeld, J., Weiß, J., Preidl, M., Korbun, T. (2008): Klimawirkungen der Landwirtschaft in Deutschland. Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Berlin.
- Holden, J. (2005): Peatland hydrology and carbon release: why small-scale process matters. *Philosophical Transactions of the Royal Society Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 363(1837), 2891-2913.
- Höper, H. (2007): Freisetzung von Treibhausgasen aus deutschen Mooren. *Telma* 37, 85-105.
- Houghton, R.A. (2007): Balancing the Global Carbon Budget. *The Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 35, 313-347.
- Illner, K. (1977): Zur Bodenbildung in Niedermoortorfen. *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 21 867-872.
- Joosten, H., Clarke, D. (2002): Wise use of mires and peatlands. International Mire Conservation Group and International Peat Society, Devon.
- Joosten, H., Brust, K., Couwenberg, J., Gerner, A., Holsten, B., Permien, T., Schäfer, A., Tanneberger, F., Trepel, M., Wahren, A. (2013): MoorFutures - Integration von weiteren Ökosystemdienstleistungen einschließlich Biodiversität in Kohlenstoff-

- zertifikate – Standard, Methodologie und Übertragbarkeit in andere Regionen. BfN-Skripten 350. Bundesamt für Naturschutz, Bonn.
- Kalbitz K., Geyer, W., Geyer, S. (1999): Spectroscopic properties of dissolved humic substances—a reflection of land use history in a fen. *Biogeochemistry* 47, 219–238.
- Kamal, S., Varma, A. (2008): Peatland Microbiology. In: Dion, P., Nautiyal, C.S. (Hrsg.) *Microbiology of Extreme Soils*, 177-203. Springer, Berlin Heidelberg.
- Kalisz, B., Lachacz, A., Glazewski, R. (2010): Transformation of some organic matter components in organic soils exposed to drainage. *Turkish Journal of Agriculture & Forestry* 34, 245–256.
- Kasimir-Klemedtsson, Å., Klemedtsson, L., Berglund, K., Martikainen, P., Silvola, J., Oenema, O. (1997): Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: a review. *Soil use and management* 13, 245-250.
- Kelleher, B.P., Simpson, A. J. (2006): Humic Substances in Soils: Are They Really Chemically Distinct? *Environmental Science and Technology* 40, 4605-4611.
- Kleber, M., (2010): What is recalcitrant soil organic matter? *Environmental Chemistry* 7, 320-332.
- Klingenuß, C., Roßkopf, N., Walter, J., Heller, C., Zeitz, J. (2014): Soil Organic Matter to Soil Organic Carbon Ratios of Peatland Soil Substrates. *Geoderma* 235-236, 410–417.
- Kögel-Knabner, I. (2002): The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. *Soil Biology & Biochemistry* 34, 139–162
- Koppisch, D. (2001a): Torfbildung. In: Succow, M., Joosten, H. (Hrsg.) *Landschaftsökologische Moorkunde* (2. Aufl.), 8 – 17. Schweizerbart, Stuttgart.
- Koppisch, D. (2001b): Kohlenstoff-Umsetzungsprozesse. In: Succow, M., Joosten, H. (Hrsg.), *Landschaftsökologische Moorkunde* (2. Aufl.), 19 – 20. Schweizerbart, Stuttgart.
- Limpens, J., Berendse, F., Blodau, C., Canadell, J.G., Freeman C., Holden, J., Roulet, N., Rydin, H., Schaepman-Strub, G. (2008): Peatlands and the carbon cycle: from local processes to global implications – a synthesis. *Biogeosciences* 5, 1379–1419.
- Maltby, E. (2009): The functional assessment of wetland ecosystems: Towards Evaluation of Ecosystem Services. CRC Press, Boca Raton.
- Martin-Neto, L., Milori, D.M.B.P., Da Silva, W.T.L., Simões, M.L. (2009): EPR, FT-IR, Raman, UV–Visible Absorption, and Fluorescence Spectroscopies in Studies of NOM.

- In: Senesi, N., Xing, B., Huang, P.M. (eds.) Biophysico-chemical processes involving natural nonliving organic matter in environmental systems, 651-728. John Wiley, Hoboken.
- Möller, D., Heller, C., Zeitz, J. (2014): CARBSTOR – Ein Online-Tool für den Moorschutz - Berechnung der Kohlenstoff-Speichermenge und des -freisetzungspotentials von Moorböden. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 46(7), 201-210.
- Mueller, L., Wirth, S., Schulz, E., Behrendt, A., Hoehn, A., Schindler, U. (2007): Implications of soil substrate and land use for properties of fen soils in North-East Germany Part I: basic soil conditions, chemical and biological properties of topsoils. *Archchive of Agronomy and Soil Science* 53(2), 113–126
- Mundel, G. (1976): Untersuchungen zur Torfmineralisation in Niedermooren. *Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 20, 669-679.
- Ottow, J.C.G. (2011): *Mikrobiologie von Böden - Biodiversität, Ökophysiologie und Metagenomik*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H. *et al.* (2008): *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*. Global Environment Centre, Kuala Lumpur und Wetlands International, Wageningen.
- Piccolo, A. (2001): The supramolecular structure of humic substances. *Soil science*. 166(11), 810-832.
- Post, W.M., Emanuel, W.R., Zinke, P.J., Stangenberger, A.G. (1982): Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 298, 156-159.
- Rice, J.A. 2001. Humin. *Soil Science* 166(11), 848-857.
- Roßkopf, N., Fell, H., Zeitz, J. (2014): Organic soils in Germany, their distribution and carbon stocks. *Catena* (eingereicht).
- Rydin, H., Jeglum J.K. (2006): *The Biology of Peatlands*. Oxford University Press, New York.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (Hrsg.) (2012): *Umweltgutachten 2012, Verantwortung in einer begrenzten Welt*. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- Schellekens, J., Buurman, P. (2011): n-Alkane distributions as palaeoclimatic proxies in ombrotrophic peat: The role of decomposition and dominant vegetation. *Geoderma* 164, 112–121.



- Schmidt, W.I., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A. *et al.* (2011): Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478, 49-56.
- Schulte, E.E, Hopkins, B.G. (1996): Estimation of soil organic matter by weight loss-on-ignition. In: Magdoff, F.R., Tabatabai, M.A., Hanlon, E.A. (Hrsg.) *Soil organic matter: Analysis and interpretation*, 21-31. Soil Science Society of America Press, Madison.
- Schwalm, M., Zeitz, J. (2011): DOC-Bildung und -Austrag in Mooren - Ein Literaturüberblick. *TELMA* 41, 137-154.
- Šlepetiene A, Šlepetys J, Liaudanskiene I. (2010): Chemical composition of differently used terric histosols. *Zemdirbyste Agriculture* 97(2), 25–32.
- Souci, S.W. (1939): Die Chemie des Moores mit besonderer Berücksichtigung der Huminsäuren unter Bezugnahme auf die balneotherapeutische Verwendung des Moores. Ferdinand Enke, Stuttgart.
- Stegmann, H., Edom, F., Koska, I. (2001): Bodenkundliche Betrachtung von Mooren. In: Succow, M., Joosten, H.(Hrsg.) *Landschaftsökologische Moorkunde* (2. Aufl.), 8 – 17. Schweizerbart, Stuttgart.
- Stevenson, F.J. (1994): *Humus Chemistry. Genesis, Composition, Reactions* (2<sup>nd</sup> ed.). John Wiley & Sons, Hoboken.
- Straková, P., Niemi, R.M., Freeman, C., Peltoniemi, K., Toberman, H., Heiskanen, *et al.* (2011): Litter type affects the activity of aerobic decomposers in a boreal peatland more than site nutrient and water table regimes. *Biogeosciences* 8, 2741–2755.
- Succow, M. (1988): *Landschaftsökologische Moorkunde*. Gustav Fischer, Jena.
- Sutton, R., Sposito, G. (2005): Molecular Structure in Soil Humic Substances: The New View. *Environmental Science & Technology* 39(23), 9009-9015.
- Tabatabai, M.A. (1996): Soil organic matter testing: An overview. In: Magdoff, F.R., Tabatabai, M.A., Hanlon, E.A. (Eds.) *Soil organic matter: Analysis and interpretation*, 1–9. Soil Science Society of America Press, Madison.
- Turetsky, M.R. (2004): Decomposition and organic matter quality in continental peatlands: the ghost of permafrost past. *Ecosystems* 7(7), 740-750.

- Turunen, J., Tomppo, E., Tolonen, K., Reinikainen, A. (2002): Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland—application to boreal and subarctic regions. *The Holocene*, 12(1), 69-80.
- Von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., Flessa, H. (2006): Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions—a review. *European Journal of Soil Science* 57(4), 426-445.
- von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E., Marschner, B. (2007): SOM fractionation methods: Relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. *Soil Biology & Biochemistry* 39, 2183–2207.
- Waksman, S.A., Stevens, K.R. (1928): Contribution to the Chemical Composition of Peat: I. Chemical Nature of Organic Complexes in Peat and Methods of Analysis. *Soil Science* 26, 113-138.
- Zauft, M., Fell, H., Glaßer, F., Roßkopf, N., Zeitz, J. (2010): Carbon storage in the peatlands of Mecklenburg-Western Pomerania, northeast Germany. *Mires and Peat* 6(4), 1-12.
- Zedler, J.B., Kercher, S. (2005): Wetland Resources: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability. *Annual Review of Environment and Resources* 30, 39-74.
- Zeitz, J., Stegmann, H. (2001): Bodenbildende Prozesse entwässerter Moore. In: Succow, M., Joosten, H. (Hrsg.) *Landschaftsökologische Moorkunde* (2. Aufl.), 47–57. Schweizerbart, Stuttgart.
- Zeitz, J. und Velty, S. (2002): Properties of drained and rewetted fen soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165, 618-626

## 9. Angaben zum individuellen Beitrag an den veröffentlichten Texten

Titel und Autoren	Beitrag C. Heller	Beitrag Co-Autor(en)
Soil Organic matter characterization of temperate peatland soil with FTIR-spectroscopy: effects of mire type and drainage intensity (Kapitel 2) C. HELLER, R.H. ELLERBROCK, N. ROßKOPF, C. KLINGENFUß & J. ZEITZ	Ausarbeitung des Forschungskonzeptes, Standortauswahl und Probenahme, FTIR-Spektroskopie, Datenauswertung, und –interpretation, Verfassen des Textes	Hilfe bei Probenahme, Hilfe bei Datenauswertung und -interpretation, Durchsicht des Manuskriptes
Approaching towards a standardized method for the hot-water-extraction of peat material to determine labile SOM in organic soils (Kapitel 3) C. HELLER & K. WEIß	Ausarbeitung des Forschungskonzeptes, Standortauswahl und Probenahme, Heißwasserextraktion, Datenauswertung, und –interpretation, Verfassen des Textes	Hilfe bei der methodischen Vorgehensweise, Hilfe bei der Ergebnisdiskussion, Durchsicht des Manuskriptes
Stability of soil organic matter in two northeastern German fen soils: the influence of site and soil development (Kapitel 4) C. HELLER & J. ZEITZ	Ausarbeitung des Forschungskonzeptes, Standortauswahl und Probenahme, chemische Fraktionierung, Datenauswertung, und –interpretation, Verfassen des Textes	Hilfe bei der Ergebnisdiskussion, Durchsicht des Manuskriptes
CARBSTOR – Ein Online-Tool für den Moorschutz (Kapitel 6) D. MÖLLER, C. HELLER & J. ZEITZ	Ausarbeitung des Forschungskonzeptes, Standortauswahl und Probenahme, Heißwasserextraktion, Datenauswertung und -interpretation (Labordaten und idealisierte Leitprofile), Verfassen d. Textes	Ausarbeitung des Forschungskonzeptes, Hilfe bei Probenahme, Datenauswertung und Interpretation (GIS-Daten, Moortypenklassifikation), Verfassen des Textes, Durchsicht des Manuskriptes
Soil Organic Matter to Soil Organic Carbon Ratios of Peatland Soil Substrates (Kapitel 5) C. KLINGENFUß, N. ROßKOPF, J. WALTER, C. HELLER, & J. ZEITZ	Hilfe bei der Probenahme, Mitarbeit bei der Datenauswertung und der Ergebnisdiskussion, Durchsicht des Manuskriptes	Ausarbeitung des Forschungskonzeptes, Probenahme, Datenauswertung, und –interpretation, Verfassen des Textes

## 10. Veröffentlichungen

### Publikationen

- Heller, C., Weiß, K. (2015): Approaching towards a standardized method for the hot-water-extraction of peat material to determine labile SOM in organic soils. Communications in Soil Science and Plant Analysis (eingereicht).
- Heller, C., Ellerbrock, R.H., Roßkopf, N., Klingenfuß, C., Zeitz, J. (2015): Soil Organic matter characterization of temperate peatland soil with FTIR- spectroscopy: effects of mire type and drainage intensity. European Journal of Soil Science (DOI: 10.1111/ejss.12279).
- Möller, D., Heller, C., Zeitz, J. (2014): CARBSTOR – ein Online-Tool für den Moorschutz Berechnung der Kohlenstoff-Speichermenge und des –Freisetzungspotenzials von Moorböden. Natur und Landschaft 46 (7), 201-210.
- Klingenfuß, C., Roßkopf, N., Walter, J., Heller, C., Zeitz, J. (2014) Soil Organic Matter to Soil Organic Carbon Ratios of Peatland Soil Substrates. Geoderma (accepted).
- Heller, C., Zeitz, J. (2012): Stability of soil organic matter in two northeast German fens: The influence of site and soil development. Journal of Soils and Sediments, Volume 12, No. 8, pp: 1231-1240. DOI: 10.1007/s11368-012-0500-6
- Heller, C. (2011): Nehmen und Geben – Moore als Stellgröße für Stoffkreisläufe. Naturmagazin 3, 6-7.
- Erbe, S., Makki, M., Heller, C. (2008): Bodenkundliche Detailuntersuchung in urbanen Gebieten als Grundlage für Stadtplanung am Beispiel der "Tiefwerder Wiesen" in Berlin-Spandau. In: Arbeitsberichte des Geographischen Instituts der HU Berlin, Heft 138.
- Heller, C. (2008): Rammsondierung zur Untersuchung von horizontalen und vertikalen Bodendichteunterschieden. Ein Vergleich zweier Standorte im Berliner Stadtgebiet. In: Arbeitsberichte des Geographischen Instituts der HU Berlin, Heft 138.
- Bíró, P., Heller, C., Makki, M. (2007): Detailkartierung als Grundlage der Landschaftsplanung am Beispiel des Naturschutzgebietes Johannisthal. In: Berliner Geographische Arbeiten, Heft 108.

Heller, C., Makki, M. (2007): Untersuchungsmethoden zur Bodenverdichtung am Beispiel Großer Tiergarten Berlin. In: Berliner Geographische Arbeiten, Heft 108

Fiedler, J., Heller, C. (2002): Die Erfassung von Stickoxiden mittels Passivsammelröhrchen. In: Endlicher, W., Fiedler, J. (Hrsg.) Klimatische und lufthygienische Untersuchungen in den Arkenbergen im Norden von Berlin. Arbeitsberichte des Geographischen Instituts der HU Berlin, Heft 74.

### **Vorträge**

Zeitz, J., Heller, C., Klingenfuß, C. (2014): Berliner Moore – ein Lebensraum im Klimawandel. Fachvortrag im Rahmen des Arbeitsgespräches „Moore und grundwasserabhängige Lebensräume“ anlässlich der Berliner Strategie zur biologischen Vielfalt, Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Berlin, 12. Februar.

Heller, C., Weiß, K., Alt, M. (2013): Methodenentwicklung einer Heißwasserextraktion für organische Böden. 125. Kongress des VDLUFA (Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V) vom 17.-20. September 2013, Technische Universität Berlin, 17. – 20. September.

Heller, C., Möller, D., Zeitz, J. (2012): CARBSTOR - A new method quantifying C-storage and evaluating C-release potentials of specific peatland types. 14th International Peat Congress: Peatlands in Balance, Stockholm, 3. – 8. Juni.

Heller, C., Zeitz, J. (2011): Decomposition stability of selected fen soils depending on substrate quality. Workshop Peat and Humic Substances, Hochschule Zittau/Görlitz, Zittau. 28. – bis 30. September.

Heller, C., Zeitz, J. (2011): Kleine Flächen – große Wirkung: Klimarelevanz von Mooren. Wissenschaftliches Kolloquium der Hochschule Zittau/Görlitz, Institut für Torf- und Naturstoffforschung, Zittau, 5. Mai

Heller, C. (2011): Methoden zur Bewertung des C-Freisetzungspotenzials von Torfen: Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „CARBSTOR“: Wissenschaftliches Kolloquium der Hochschule Zittau/Görlitz, Institut für Torf- und Naturstoffforschung, Zittau, 5. Mai.

Heller, C. (2011): Stability of SOM in Mires and Peatlands depending on Parent Material and Soil Forming Processes. Workshop: Co-Evolution of soils and organic substances:

Links between soil forming processes and the stabilisation of organic substances, Landau, 2. – 4. März.

Heller, C. (2011): Untersuchungen zum Kohlenstoff-Freisetzungsverhalten ausgewählter Moorböden in Abhängigkeit von Ausgangssubstrat und Pedogenese: Bodenkundliches Kolloquium, Technische Universität Berlin, FG Bodenkunde-Standortkunde/Bodenschutz, Berlin, 25. Januar.

### **Posterbeiträge**

Thrum, T., Möller, D., Heller, C., Klingenfuß, C., Zeitz, J. (2013): Bewertung der Ökosystemdienstleistungen von Mooren - Anwendungen und Grenzen des Bodenfunktionskonzeptes. Posterbeitrag zur Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 2013, 7.9. – 12.9.2013, Universität Rostock.

Heller, C., Möller, D., Klingenfuß, C., Zeitz, J. (2012). Berliner Moorböden im Klimawandel-Entwicklung einer Anpassungsstrategie zur Sicherung ihrer Ökosystemdienstleistungen. Posterbeitrag zur Sektionstagung der Deutschen Gesellschaft für Moor- und Torfkunde: Moore in ihren Einzugsgebieten, 6.9.-8.9.2012, Werbellinsee.

Heller, C., Zeitz, J. (2011): Untersuchungen zur Qualität von Moorböden im Hinblick auf C-Freisetzungspotenziale. Posterbeitrag zur Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft 2011, 3.9. – 9.9.2011, Technische Universität Berlin.

Heller, C., Möller, D., Zeitz, J. (2010): CARBSTOR – ein Verfahren zur Quantifizierung und Bewertung der C-Speicher und des C-Freisetzungspotentials von organischen Böden. Posterbeitrag zur 6. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Limnologie, 27.9. - 1.10. 2010, Universität Bayreuth.

## 11. Danksagung

Ohne die zahlreiche Unterstützung und Hilfe vieler Menschen wäre diese Arbeit nicht entstanden. An erster Stelle danke ich meiner Betreuerin, Fachgebietsleiterin und erster Gutachterin Frau Prof. Dr. Jutta Zeitz, die mir immer die notwendigen Freiräume gab, verschiedene methodische Ansätze zu testen und die mich während der Forschungsarbeiten stets fordernd und fördernd begleitete. Außerdem danke ich Frau Prof. Dr. Friederike Lang, Professur für Bodenökologie an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, die sich sofort bereit erklärt hat, als zweite Gutachterin zur Verfügung zu stehen. Die Analysenergebnisse der Boden- und Pflanzenproben kamen nur durch intensive Laborarbeiten zustande, insbesondere durch die enge, unkomplizierte Vernetzung und Zusammenarbeit mit dem institutseigenen Gemeinschaftslabor Analytik und den dort tätigen Kollegen, denen ich zu besonderem Dank verpflichtet bin. Danke auch an das Labor und die Mitarbeiter des Instituts für Bodenlandschaftsforschung am ZALF in Müncheberg, wo ich die spektroskopischen Arbeiten durchführen durfte. Weiterer Dank geht an alle beteiligten Co-Autoren meiner Veröffentlichungen, ohne die die Manuskripte in dieser Form nicht existieren würden. Den Kollegen im Fachgebiet Bodenkunde und Standortlehre gebührt ganz besonderer Dank. Ich nenne keine Namen und vergesse daher auch niemanden. Ihr seid tolle Menschen in einem super Team und sowohl fachlich als auch persönlich eine Bereicherung. Zum Schluss möchte ich meiner Familie danken, insbesondere meinen Eltern, meinen Brüdern und meiner Freundin, die mir auch in stressigen Momenten immer den Rücken frei gehalten haben und ohne die ich nicht der wäre, der ich heute bin.

## **12. Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel: „Untersuchungen zur Qualität der organischen Bodensubstanz und zum Kohlenstofffreisetzungspotential von Moorböden in Abhängigkeit von Bildungsbedingungen und Entwässerungsintensitäten“ selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe. Ich versichere, dass ich ausschließlich die angegebenen Quellen in Anspruch genommen habe. Die Dissertation lag bisher keinem Promotionsverfahren zugrunde - weder in Teilen noch als Ganzes. Weiterhin versichere ich, dass von mir an keiner anderen Stelle ein Promotionsverfahren beantragt wurde und dass ich keinen entsprechenden Doktorgrad besitze. Die geltende Promotionsordnung ist mir bekannt.

Berlin, den 6.7.2014

Christian Heller